

MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN ÁREAS DE LLANURA

Carlos Scioli¹, Georgina Cazenave² y Adolfo Villanueva³

RESUMEN --- En áreas donde el relieve es muy suave los modelos hidrológicos clásicos tienen poca o ninguna aplicabilidad, porque el concepto de convergencia del flujo hacia una red de drenaje frecuentemente no es válido. Además el escurrimiento en lámina generalmente es más que el encauzado, pudiendo tomar caminos diferentes dependiendo de la altura del agua. Las particularidades que presentan los sistemas de llanura hacen que la calibración de los modelos se aparte de los procedimientos convencionales.

Teniendo en cuenta esto se utilizó un modelo distribuido de grilla para modelar el escurrimiento superficial y se realizó un proceso de calibración basado en analizar la evolución del agua acumulada sobre el terreno. Este análisis se realizó contrastando de manera cualitativa los resultados del modelo con imágenes satelitales.

Los resultados del modelo se utilizaron para analizar el movimiento multidireccional del agua sobre el terreno. Con este análisis se evaluó la variación del tamaño y forma de las áreas de aporte a las secciones de salida y la dirección del escurrimiento sobre el terreno.

El modelo está siendo utilizado para establecer la zonificación de inundaciones que afectan a la práctica agrícola en la zona, a partir de la distribución espacial de las áreas inundables.

ABSTRAC --- In areas with very low relief classic hydrological models have little or no applicability, because the concept of convergence of flow towards a drainage network frequently is not valid. Moreover, sheet runoff generally is more frequent than channel one, and flow can take different directions, depending on water height. The characteristics of this kind of systems means that model calibration cannot follow conventional procedures.

Because of that, a grid distributed model was used to simulate superficial runoff and it was calibrated analyzing the spatial evolution of flood water on the area. This analysis was carried on in a qualitative way comparing model results with satellite images

Model results were then used to analyze the multidirectional movement of water. With this analysis the variation in size and form of the contributing areas to several "basin exit points", and the runoff direction were evaluated. The model is now being used to establish the flood zoning from the spatial distribution of flood areas, aiming at the flood impact on agriculture.

Palabras-claves: áreas planas, modelo distribuido

1) Becario de Perfeccionamiento de CIC – Instituto de Hidrología de Llanuras – Email: scioli@faa.unicen.edu.ar

2) Becaria de la ANPCyT – Instituto de Hidrología de Llanuras

3) Prof. adj. Instituto de Hidrología de Llanuras - UNCPBA

INTRODUCCIÓN

Con la necesidad de analizar el comportamiento de sistemas hidrológicos en zonas de llanura surge la iniciativa de utilizar una modelación matemática para describir la respuesta del sistema. El principal inconveniente en zonas donde el relieve es muy suave es que el concepto de convergencia del flujo hacia una red de drenaje con frecuencia no es válido. Como consecuencia, los modelos hidrológicos clásicos, y las correspondientes metodologías de implementación y calibración tienen poca o ninguna aplicabilidad. En estos sistemas no es simple definir cuencas y redes de drenaje para la aplicación de esas metodologías, y es necesario lidiar con los siguientes fenómenos:

- frecuentemente los cauces y las divisorias de agua no están bien definidas, y como consecuencia el escurrimiento puede tomar caminos diferentes dependiendo de la altura de agua;
- cambios pequeños en la elevación del relieve ocasionados por las acciones antrópicas (camino, canales o hasta los surcos de maquinaria agrícola) pueden causar efectos importantes en la dinámica hídrica de la zona;
- en inundaciones el escurrimiento en lámina es frecuente, muchas veces más que el encauzado;
- el peso relativo del movimiento vertical del agua es mayor que en sistemas hidrológicos típicos.

Durante las inundaciones, el concepto de convergencia del escurrimiento hacia una red de drenaje que es la principal vía de movimiento del agua no es aplicable. La capacidad de escurrimiento de los cauces es muy pequeña, y el valle de inundación no está bien definido. Eso genera inundaciones de poca profundidad y gran extensión; un arroyo de pocos metros de ancho puede tener un frente de inundación del orden de algunos km.

Además, se produce un fenómeno de llenado y encadenamiento de áreas bajas y el agua ocupa, de manera discontinua, superficies del orden de centenas o miles de km². Son inundaciones de pequeña profundidad, generalmente menos de un metro, y tiempo de permanencia muy largo en relación al área de aporte. No es rara una lámina de agua de algunas decenas de centímetros durante 10, 15 o hasta 20 días.

La situación presentada en la Figura 1 es un ejemplo de la respuesta de estos sistemas a un evento extremo. Esta figura muestra la inundación ocurrida en agosto del 2002 en el partido de Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. El cauce del arroyo del Azul tiene un ancho de pocos metros (2 a 10 m) pero durante el pasaje de una crecida éste desborda y presenta un frente de inundación del orden de unas cuantas centenas de metros. En la zona a la derecha del arroyo se observa una red de drenaje anastomosada, donde no es posible identificar una red de drenaje jerarquizada, ni un punto que represente la salida del sistema. En épocas normales ésta área se encuentra prácticamente sin agua, ya que solo presenta pequeños almacenamientos superficiales del orden de 1 a 5 ha.

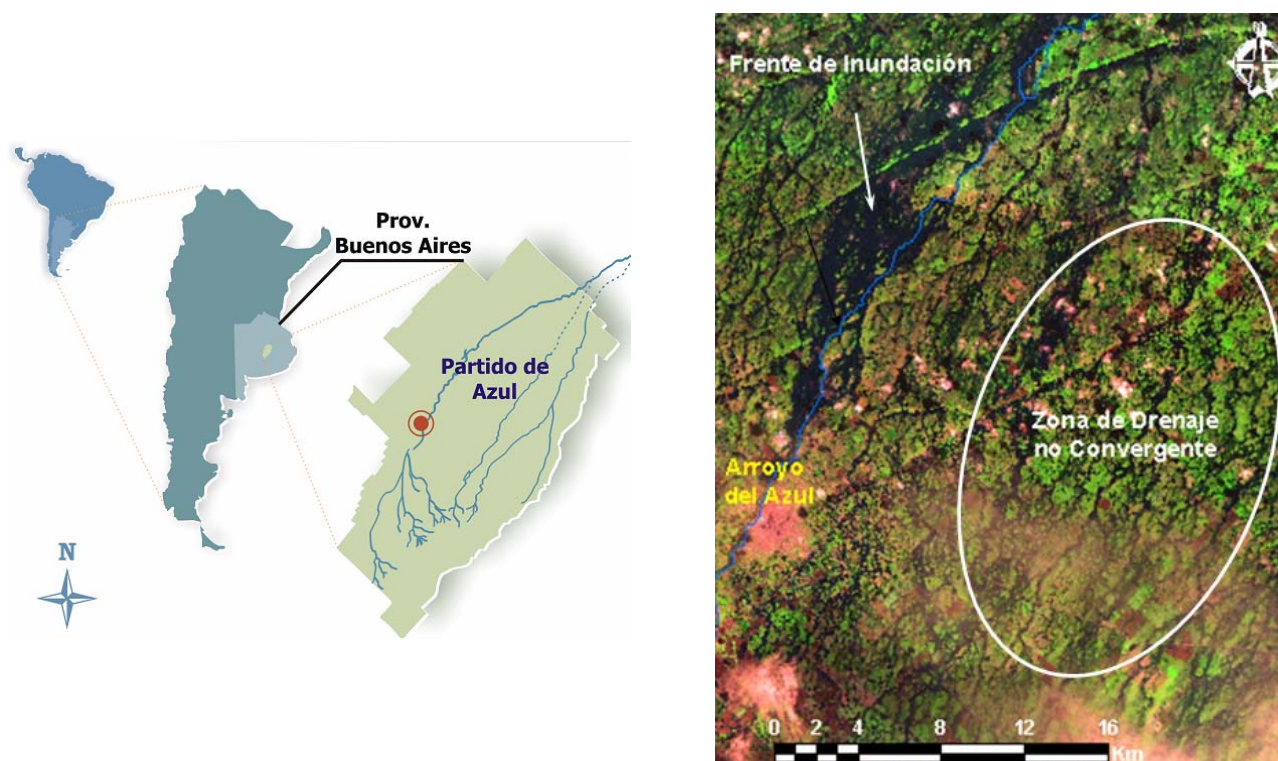


Figura 1 – Patrón de anegamiento típico de la llanura en la zona de Azul, Prov. de Buenos Aires. (Landsat TM 7 – 20/08/02)

Por lo general, para analizar el impacto de eventos extremos y de medidas de control se utilizan modelos matemáticos. Para poder simular el movimiento del agua en áreas llanas, los modelos utilizados deben ser capaces de representar la distribución espacial del agua y las características del escurrimiento mencionadas en párrafos anteriores. Los modelos distribuidos, en principio, son los más adecuados para modelar este tipo de áreas, pero sólo algunos de ellos tienen la capacidad de representar adecuadamente el escurrimiento superficial de estos sistemas.

Un modelo que cumple con los requisitos necesarios es el Simulaciones Hidrológicas I (SSHH-I) (Riccardi, 2000; Rentería y Stenta, 2003) desarrollado en la Universidad Nacional de Rosario. Este modelo distribuido de grilla es el que se empleó en este trabajo para la modelación del escurrimiento superficial en el sistema.

La representación del escurrimiento superficial y de la acumulación del agua sobre la superficie del terreno es un elemento básico para el planteo de estudios de planificación y gerenciamiento de recursos hídricos y su relación con la actividad productiva de la zona. El presente trabajo fue desarrollado buscando avanzar en el conocimiento de las condiciones de implementación y calibración de la modelación matemática en áreas llanas.

LUGAR DE TRABAJO

El trabajo se realizó en la región aledaña a la localidad de Orense, perteneciente al partido de Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina. El partido de Tres Arroyos esta situado al sureste de la Provincia de Buenos Aires, como se muestra en la Figura 2. Este partido es agrícola-ganadero por excelencia, con un importante sector industrial en la zona urbana y peri-urbana. La superficie del

partido es de 5.861 Km² y su población está cercana a los 57.000 habitantes en todo el partido, mientras que en la ciudad cabecera tiene una población de 45.000 habitantes.

En noviembre de 2002, una lluvia de aproximadamente 10 años de tiempo de retorno generó una inundación del tipo de las descriptas anteriormente, que provocó pérdidas directas del 25 % de las cosechas de trigo y girasol, por un valor del orden de US\$ 42 millones (Villanueva et al., 2009).

La zona de estudio es un área de llanura cercana a la localidad de Orense y está localizada en el sector sureste del partido, al sur de la RP 228, como se puede ver en la Figura 2. En la figura se muestra el sistema de drenaje superficial del partido de Tres Arroyos, que cuenta con 3 componentes principales. Esos componentes son: el sistema del arroyo Claromecó, cuya cuenca alta está formado por 3 brazos que confluyen en la ciudad de Tres Arroyos; el río Quequén Salado, que drena la región oeste del partido, y es límite con el partido de Dorrego y el arroyo Cristiano Muerto que drena la región este del partido, y conforma el límite con el partido de San Cayetano, desde la RP 228 hasta el mar.

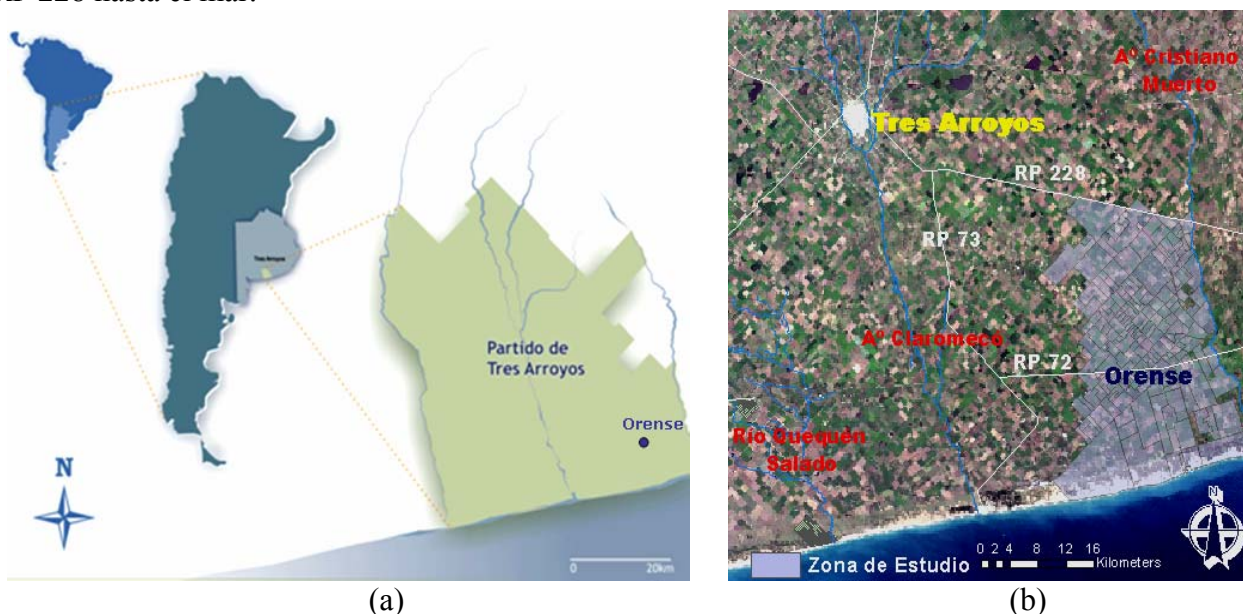


Figura 2 – Provincia de Buenos Aires – (a) Partido Tres Arroyos – (b) Zona de Orense

El área de aporte a la localidad de Orense tiene una superficie de 1250 Km², una pendiente media en sentido N-S de 2,5 ‰ al norte de la RP 228, y de 1,5 ‰ al sur de dicha ruta, como se muestra en la Figura 3. Este significativo cambio de pendiente provoca que en esta última franja se presenten frecuentemente problemas de anegamiento y escurrimiento en lámina.

En la imagen de satélite de la figura 3 es visible el cambio en los patrones de drenaje que se produce en la RP 228. Al sur hay un drenaje difuso y anastomosado, con abundantes puntos de acumulación de agua, del orden de pocas hectáreas. La baja pendiente y el poco relieve de esta zona hacen que el área no tenga la capacidad de evacuar rápidamente volúmenes importantes de agua. El escurrimiento superficial es mayoritariamente mantiforme y no tiene una dirección definida.

La red de drenaje natural de la zona estudiada ha sido modificada con el paso del tiempo producto de diferentes factores. Estas modificaciones han provocado alteraciones en la forma en que las inundaciones afectan a la región.

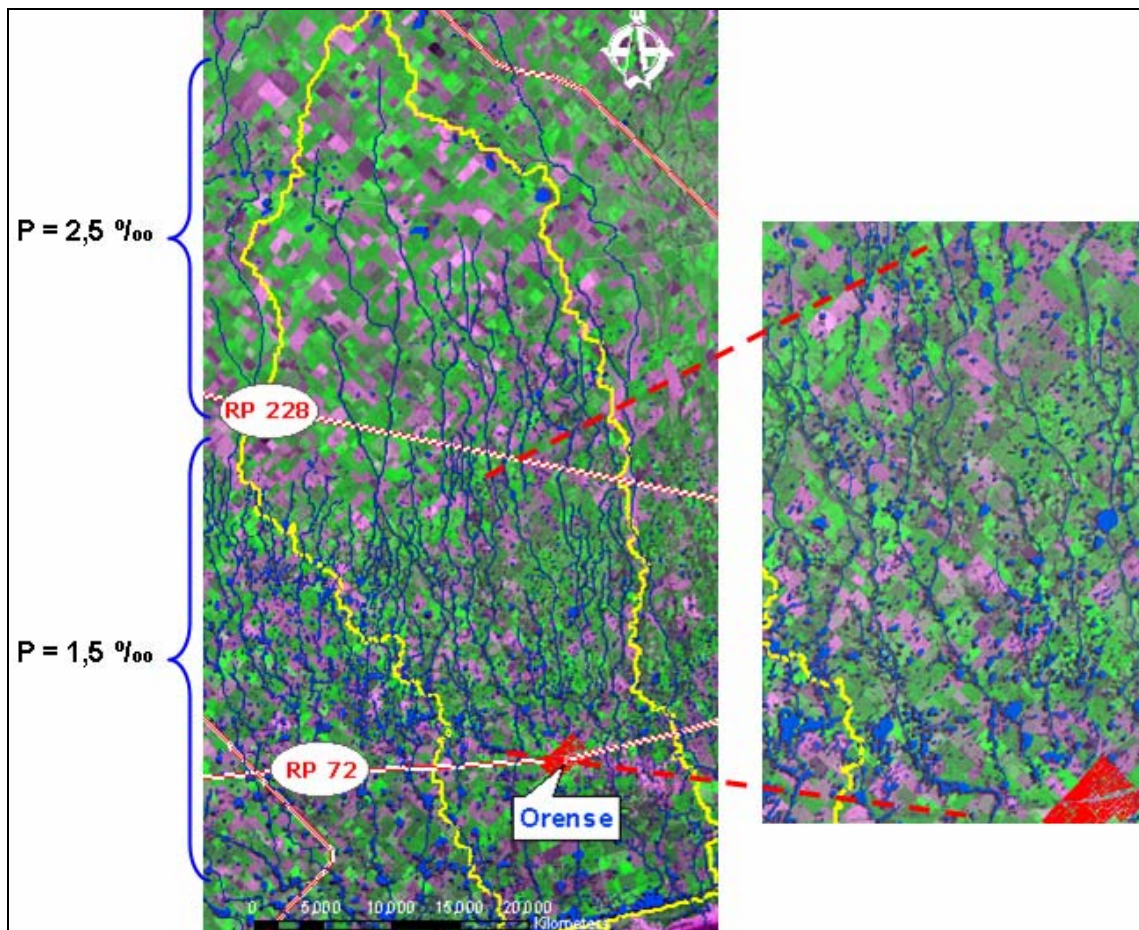


Figura 3 – Área de aporte a la localidad de Orense – Zonas de diferentes pendientes medias

Uno de los factores que modificó el escurrimiento en la zona fue la profundización de los caminos debido a factores como tipo de suelo, erosión hídrica y/o eólica y acción antrópica. Estos cambios provocaron que los caminos comiencen a concentrar y propagar el escurrimiento en épocas de excesos, modificando la red de drenaje natural.

Otra acción que afectó el escurrimiento superficial fue la construcción de una red de canales, por motivos como drenaje de crecidas, vaciado de lagunas, etc. La red de canales artificiales tiene por función captar el agua que escurre de manera mantiforme, y conducir a ésta hacia el mar.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el escurrimiento superficial de la región sufrió modificaciones producto de la acción antrópica. Estos cambios han provocado un direccionamiento del agua en épocas de excesos hacia la zona de Orense. Los efectos de estos cambios quedaron expuestos en la inundación ocurrida en noviembre del 2002. Este evento ocasionó desbordes de canales, anegamientos de campos e inundó parte de la localidad de Orense.

Actualmente la zona sigue presentando inconvenientes en el manejo del agua ya que se ha construido nuevos canales para dar una solución inmediata a los problemas de excesos, sin evaluar los efectos que éstos producirían en épocas de déficit hídrico. Los nuevos canales drenan rápidamente las áreas anegadas pero se debe tener en cuenta que éstos pueden continuar funcionando durante un período de sequía y ocasionar una depresión indeseada del nivel freático.

MODELACIÓN EN ZONAS DE LLANURA

La modelación matemática de los sistemas de llanura presenta complicaciones en el proceso de calibración ya que en estos sistemas no existe el una cuenca definida y una jerarquización de cauces que permita cuantificar fácilmente su respuesta ante un estímulo. La utilización de métodos convencionales es adecuada cuando la respuesta del sistema puede ser representada en puntos específicos (la salida de la cuenca o subcuenca). En cambio, estos métodos no pueden ser aplicados en estos sistemas, ya que es difícil definir algún punto que represente el estado del sistema y/o la evolución del fenómeno. Esto se debe a que no existe concentración del escurrimiento en los cauces sino, al contrario, dispersión en grandes áreas

Otro inconveniente en estos sistemas, es que no existen criterios definidos para responder a la pregunta: “¿Qué medir, donde y como?”. Esto se debe a que sobre este tipo de sistema no ha habido un desarrollo de metodologías o técnicas que sirvan de guía para la cuantificación real de su respuesta ante una precipitación. La dificultad de no contar con datos observados que representen la respuesta del sistema hace que la calibración de los modelos matemáticos no sea simple. Para la calibración modelos es estos sistemas es necesario contar con información del estado de inundación del terreno y de los escurrimientos mantiforme y encauzado. En general, las propiedades que tienen estos sistemas hacen que sea necesario utilizar técnicas no convencionales, como la comparación con imágenes de satélite, para la calibración de los modelos.

Modelo utilizado para la simulación del sistema

Para la modelación del sistema se utilizó el modelo distribuido de grilla, SSHH-I (Simulaciones Hidrológicas I), con el cual se puede simular el movimiento del agua sobre la superficie del terreno. Este modelo fue desarrollado en la Universidad Nacional de Rosario por Riccardi (2000) y Rentería y Stenta (2003). Este modelo representa y vincula el escurrimiento mantiforme con el encauzado.

El SSHH-I discretiza el terreno en forma de grilla o celdas y aplica las ecuaciones de escurrimiento en cada una de ellas. Las variables que definen la geometría del almacenamiento en las celdas y los parámetros hidráulicos como el coeficiente de rugosidad, se estiman a partir de las características físicas de la cuenca (topografía, suelos, vegetación, geología, etc.).

El modelo representa el relieve de la zona discretizando el terreno a nivel de grilla, utilizando como base un modelo digital de elevaciones (DEM), en el cual se delimita el área de trabajo o celdas de cálculo. Dependiendo del tamaño de grilla, el modelo puede representar el almacenamiento y movimiento del agua sobre la superficie del terreno, y no solo en los cursos de agua como se muestra en la Figura 4.

Las celdas pueden representar la superficie del terreno o tramos de cauce y se relacionan entre sí mediante relaciones hidráulicas simples, como la ecuación de Manning, vertederos, etc. Un ejemplo de este modelo de celdas del Delta del Mekong de la SOGREAH presentado por Cunge (1980). A cada celda se le asigna un valor de cota determinada de un DEM para representar la topografía del terreno. El modelo no necesita de una delimitación previa de cuencas y es posible asignar varios puntos de salida al sistema.

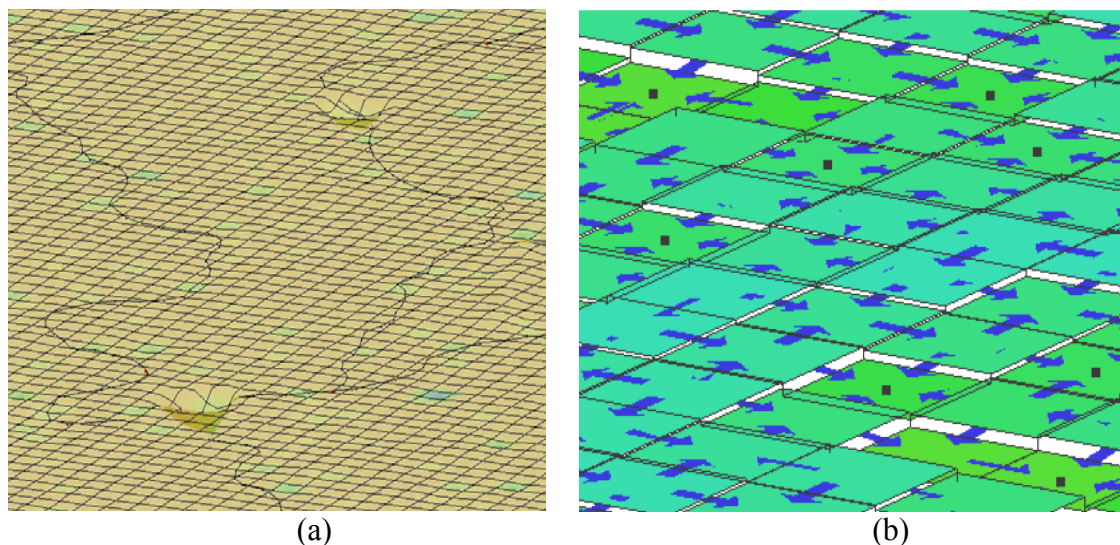


Figura 4 – Modelo Hidrológico Distribuido – (a) discretización por grilla – (b) movimiento del agua sobre la superficie del terreno

El modelo simula el proceso de escorrentía con flujo dinámico multidireccional y determina el movimiento del agua a partir de la información topográfica y del tirante de agua en cada celda. La topografía incorporada en el modelo puede ser modificada fácilmente para imponer al modelo canales o cauces pequeños de agua que no estén representados en el DEM.

El escurrimiento entre celdas puede ser calculado mediante diferentes ecuaciones de descarga. Estas ecuaciones incluyen aproximaciones cinemáticas y difusivas de la ecuación de cantidad de movimiento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación.

Los escurrimientos encauzado y superficial pueden ser simulados a través de singularidades tales como puentes, vertederos, alcantarillas, uniones/bifurcaciones, cambios de sección, estaciones de bombeo, etc. ya que el modelo tiene incorporada las leyes de descarga de cada una de ellas.

Las características que presenta el SSHH-I hacen que sea una herramienta adecuada para su utilización en modelaciones hidrológicas en zonas de llanura. La desventaja que presenta es la imposibilidad de realizar simulaciones hidrológicas continuas necesarias en la evaluación de estos sistemas ya que no cuenta con los algoritmos para determinar las pérdidas por infiltración.

Implementación del SSHH I

Para representar la topografía del área de estudio se utilizó el DEM SRTM de 90 m, complementado con cartas topográficas (escala 1:50000), imágenes satelitales de la región y salidas a campo. Para la utilización del SRTM se debieron corregir algunos errores como el efecto de las arboledas y el truncamiento de los decimales en los valores de elevación.

Los montes o arboledas son representados como elevaciones del terreno porque el método de interferometría de radar utilizado para la construcción del SRTM no logra diferenciar la superficie de las copas de los árboles de la del terreno. Para corregir este efecto se identificaron y caracterizaron los montes existentes en la zona a partir de las imágenes satelitales. Luego se identificaron las celdas del SRTM que eran afectadas por los montes y se modificaron sus elevaciones.

Los valores de elevación en cada celda del SRTM no tienen decimales, esto genera que entre dos celdas contiguas de diferente cota el desnivel mínimo sea de un metro, lo que no es físicamente realista en la región en estudio. Estos desniveles causan en la modelación distorsiones al escurrimiento, como por ejemplo que el agua se acumule en depresiones de un metro de profundidad y del tamaño de una celda.

Para corregir este problema se analizó para qué tamaño de celda se suavizaba el error por truncamiento del SRTM de 90 m. Los desniveles entre celdas se atenuaron para valores de celda mayores a 270 m, es por esto que se escogió este tamaño para la construcción del nuevo DEM.

Luego de cargar el nuevo DEM de celdas de 270 m en el SSHH-I se delimitó la zona simulada. La delimitación de esta zona se realizó teniendo en cuenta que el área de estudio no tiene una superficie de aporte claramente definida, por efecto del intercambio de agua que produce con las áreas vecinas. Por ello, estas áreas fueron incluidas dentro de la zona simulada para poder representar el fenómeno de trasvasamiento que existe entre las divisorias topográficas de agua. Para considerar el intercambio de agua entre estas divisorias se adoptó como límite del modelo un área mayor a la delimitada inicialmente por las divisorias de agua topográficas.

Los canales, terraplenes y alcantarillas no son detectados por la topografía utilizada. Teniendo en cuenta la importancia que tiene representar el movimiento del agua en este tipo de obras, éstas fueron incorporadas al modelo como celdas cauce o funciones de descargas de caudal. Esta información se incorporó al modelo SSHH I utilizando herramientas de GIS. Con esta herramienta se procesó la información digital disponible (traza de red de canales, caminos, rutas) para que ésta pueda ser posteriormente agregada al SSHH I. (Figura 5).

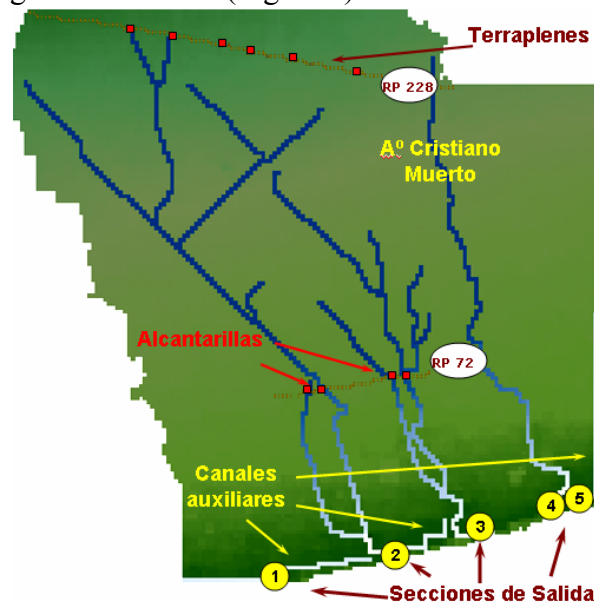


Figura 5 – Identificación de terraplenes, alcantarillas y ubicación de las secciones de salida y canales auxiliares en la zona simulada con el SSHH-I

El arroyo Cristiano Muerto, señalado en la Figura 5, se representó en el modelo. Parte del agua que desborda de su cauce al sur de la RP 228 escurre hacia la zona de estudio. Por ello fue necesario introducir como dato de entrada los caudales que escurren por el cauce para el período simulado, determinado en el estudio realizado por Villanueva et al. (2007).

Los caudales se ingresaron en una sección del arroyo a la altura de la RP 228 y desde ahí se propagaron a través de las celdas cauce que representan al arroyo hasta la salida del sistema. Este tramo del arroyo cuenta con su correspondiente área de aporte, la cual drena hacia el cauce o, en ocasiones, hacia las áreas de aporte limítrofes. El ingreso del caudal se realizó en ese punto porque aguas arriba de ese punto los desbordes del arroyo no escurren en dirección a la zona de estudio.

Para este trabajo se utilizó el evento correspondiente a noviembre del 2002, este evento se escogió, fundamentalmente, porque es el único para el cual hay información en cantidad y calidad razonable. Además, esa tormenta, provocó el anegamiento en distintas zonas del partido, siendo muy afectada la localidad de Orense. La determinación de la lluvia neta se realizó el método de CN.

La condición inicial del modelo se determinó en función del estado del nivel freático, los almacenamientos superficiales y la red de canales. Los valores del nivel freático estaban altos, alcanzando profundidades en algunas zonas de apenas 40 cm, indicando que el suelo estaba saturado. Las precipitaciones e imágenes satelitales de meses anteriores mostraron que la zona estaba con agua en la superficie. Además, los pobladores de la zona indicaron que los campos estaban encharcados y los canales estaban llenos durante esos meses. A partir del escenario reconstruido se definió la condición inicial de la zona de estudio, siendo ésta la de un sistema saturado, o sea con los almacenamientos superficiales llenos y la red de drenaje saturada.

En celdas al final de la red de canales se colocaron como condición de salida curvas H-Q. Las secciones de salida del modelo y los canales auxiliares se muestran en la Figura 5.

CALIBRACIÓN EN BASE A LA COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITES

Las características del SSHH-I permitieron plantear una metodología alternativa para calibrar el modelo. Como el modelo representa la distribución espacial de la inundación de la zona simulada fue posible comparar estos resultados con las imágenes satelitales, verificando que el modelo represente los anegamientos y desbordes de canales en la zona.

Con el SSHH-I se realizó un proceso de calibración que consistió en analizar de manera cualitativa de que manera el modelo representa el movimiento del agua y la distribución espacial de la inundación en el área de estudio. Para la calibración se realizó una comparación entre la variación temporal del agua acumulada sobre el terreno en el sistema real y el simulado.

Luego, para analizar la representatividad de los resultados del modelo calibrado se planteó la realización de un análisis espacial general, comparando estos resultados con las imágenes satelitales. Paso seguido se realizó un análisis puntual, verificando que el modelo represente los anegamientos y desbordes de canales en el área de estudio.

Parámetros de calibración

Como primera actividad se analizaron los parámetros del modelo y luego se procedió a hacer una estimación inicial de sus valores. Estos valores fueron determinados mediante una revisión bibliográfica y de trabajos realizados en regiones similares a la de estudio (Cazenave et al, 2007; Villanueva et al. 2006, 2007).

Los parámetros de calibración del SSHH I son las pendientes transversales de conducción (Itc) y almacenamiento (Ita), el ancho mínimo de cada celda (A), el valor de CN y las rugosidades nov y del río (nRío). Con esta cantidad de parámetros el proceso de calibración se convierte en una tarea complicada y difícil de realizar, y no se cuenta con datos observados necesarios para llevar adelante una adecuada calibración de estos parámetros.

Teniendo en cuenta que la calibración del modelo se realiza a partir del análisis de la distribución espacial del agua acumulada sobre el terreno se escogieron parámetros que tengan influencia directa sobre ella. Para el análisis se eligieron dos parámetros, uno que modifica la cantidad de agua (CN) y otro que regula el movimiento del agua sobre la superficie (nov). Los demás parámetros fueron utilizados en la modelación con los valores estimados inicialmente.

Representación de los resultados

La comparación de los resultados del modelo con la información que representa el estado del sistema se realizó por medio de imágenes del agua acumulada sobre la superficie. Esto fue posible ya que uno de los resultados que genera el SSHH-I es una matriz de datos con el valor de la lámina de agua sobre cada celda en un período de tiempo.

Antes de proceder con la comparación mencionada se realizó un testeo de técnicas para mejorar la representación de los resultados de las simulaciones. La representación de las áreas con agua sobre el terreno se realizó con imágenes creadas con herramientas de un GIS a partir de los resultados de las simulaciones. Para facilitar la comparación de estas imágenes con el sistema real se plantearon y analizaron metodologías que mejoren la representación de los mismos. Para esto se adoptó un valor de tirante de 10 cm (Figura 6), a partir del cual la celda fue considerada con agua y se testearon técnicas para confeccionar imágenes que mejor representen el movimiento del agua en el sistema hídrico.

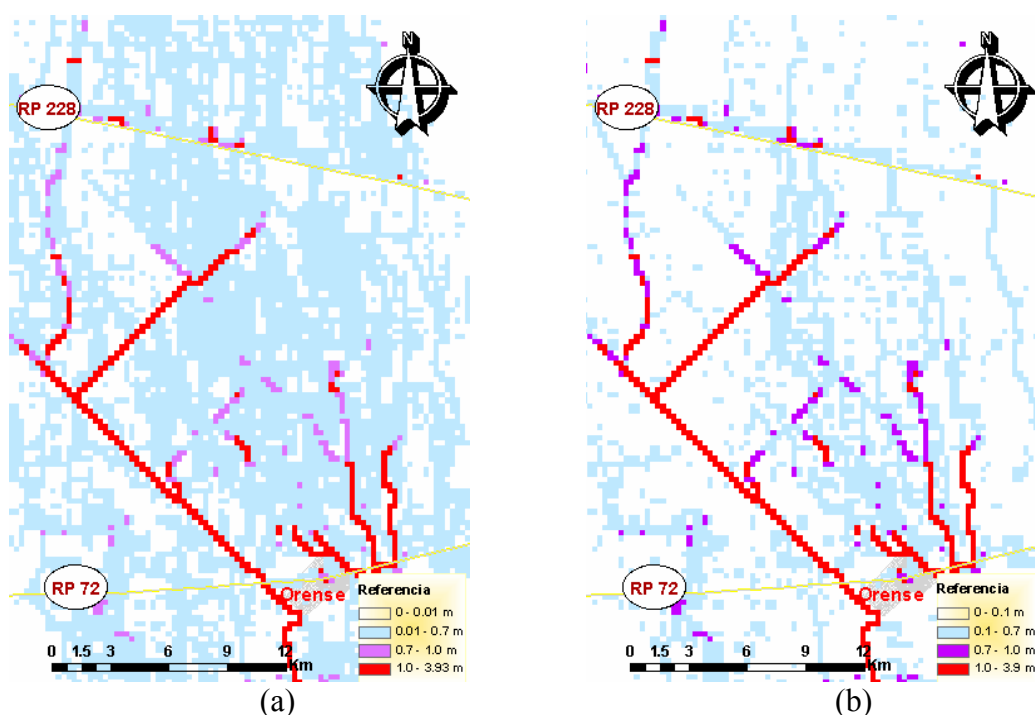


Figura 6 – Representación en una imagen de los resultados del modelo. (a) Visualización de todas las celdas con agua – (b) Visualización de celdas con un tirante mayor a 0,10m

Comparación del sistema simulado con el real

Los parámetros inicialmente considerados fueron el CN y n_{ov} , siendo este último el único que pudo ser calibrado con el proceso presentado en este trabajo. El valor de CN se estimó a partir de estudios hidrológicos realizados en cuencas vecinas, o sea, no fue parámetro de calibración.

Las causas por las cuales no se pudo calibrar el CN mediante la comparación de imágenes fueron dos. La primera de ellas es a que no se tiene la información para evaluar el efecto que produce un cambio del CN. La calibración planteada en este trabajo podría realizarse si se tuviera más de una imagen satelital para representar el estado del sistema en ese período y sólo se tiene una, la imagen Sac-C.

La segunda causa es que no fue posible determinar de alguna forma la cantidad de agua sobre el terreno. Si bien es posible determinar la superficie con agua sobre el terreno no se pudo calcular el volumen de agua en el sistema real. Para determinar la cantidad de agua en el terreno son necesarias imágenes de alta resolución espacial y una buena información topográfica. Determinando la variación de las superficies de agua de una imagen a otra y con la información topográfica tal vez sería posible calcular el volumen de agua sobre el terreno.

Para este trabajo no se contaba con el tipo de información mencionada, por lo tanto no fue posible calibrar el valor de CN comparando los resultados del modelo con las imágenes satelitales. Por lo tanto para determinar la lluvia neta se utilizó el valor de CN utilizado en estudios de cuencas vecinas. El valor que se adoptó fue un CN de 65, el cual se determinó para la modelación de la cuenca del arroyo Claromecó por Villanueva et al (2006).

El otro parámetro que intervino en el proceso de calibración fue el n_{ov} . El valor de éste se calibró comparando la evolución temporal del agua acumulada sobre el terreno del sistema real con el simulado. Para determinar esta evolución temporal del sistema real y simulado para diferentes valores de n_{ov} se utilizaron imágenes satelitales. Las imágenes utilizadas corresponden al 15 y 24 de noviembre, siendo la primera una imagen del satélite Sac-C y la otra una del Landsat. La principal diferencia entre estas dos imágenes radica en que la primera tiene una resolución espacial de 170x170m y la segunda de 30x30m.

La variación de la superficie con agua sobre el terreno del sistema real se determinó comparando las máscaras de agua que se presentan en la Figuras 7 y 8 corresponden a cada imagen satelital. Esta variación real de la cantidad de agua sobre el terreno se comparó con las calculadas con el modelo para los diferentes valores de n_{ov} . Con la comparación de estas imágenes se observó que la variación del agua acumulada sobre el terreno determinada con valor de $n_{ov}=0,20$ es la que mejor ajusta los resultados del modelo a la variación real. Por lo tanto este valor se adoptó para el parámetro n_{ov} .

En las Figuras 7 y 8 se observan las máscaras de agua junto a los resultados de la simulación. Estos últimos son producto de simular el sistema con el valor de $n_{ov}=0,20$ obtenido en la calibración y el valor estimado de CN= 65.

Realizando una comparación espacial se observa que el modelo representa de manera aceptable la distribución del agua sobre la superficie del terreno y los caminos del escurrimiento.

Haciendo una comparación temporal, o sea comparando entre las imágenes de distintos días (Figura 7 y 8), se identificó que el modelo también reprodujo satisfactoriamente la evolución temporal de la superficie con agua sobre el terreno.

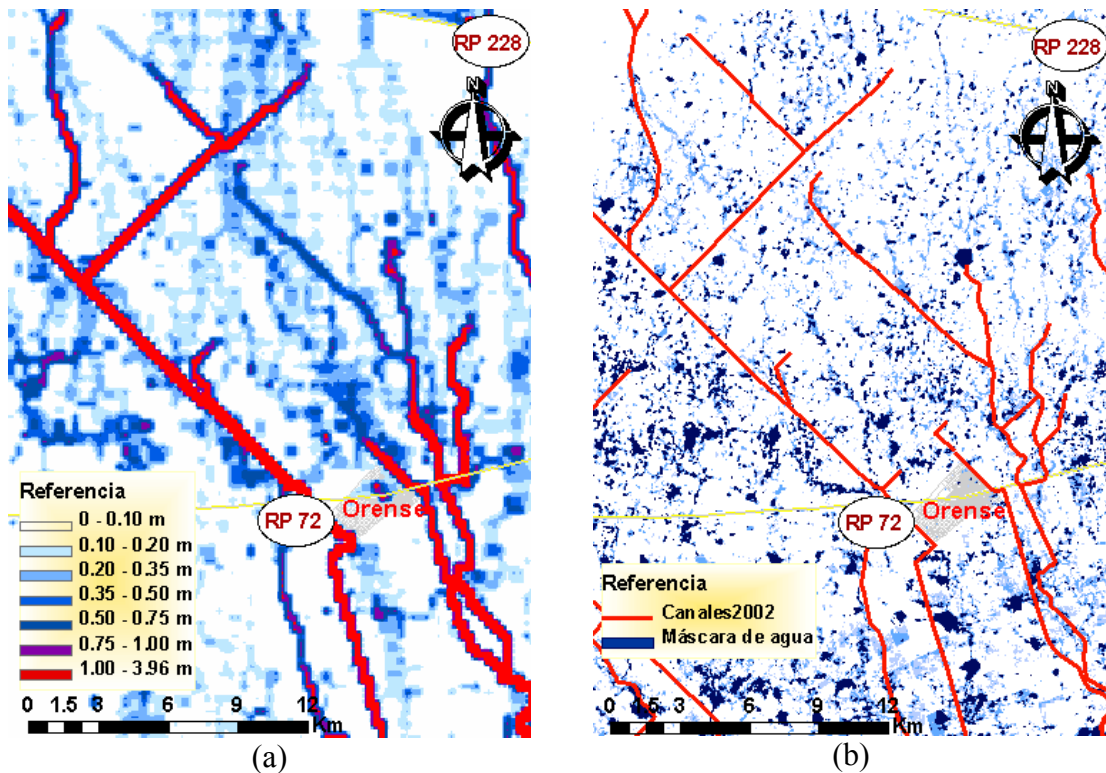


Figura 7 – Imágenes correspondientes al cuarto día después de terminada la lluvia. (a) Resultados para valores de $CN = 65$ y $n_{ov} = 0,20$. (b) Máscara de agua determinada con la imagen Sac-C

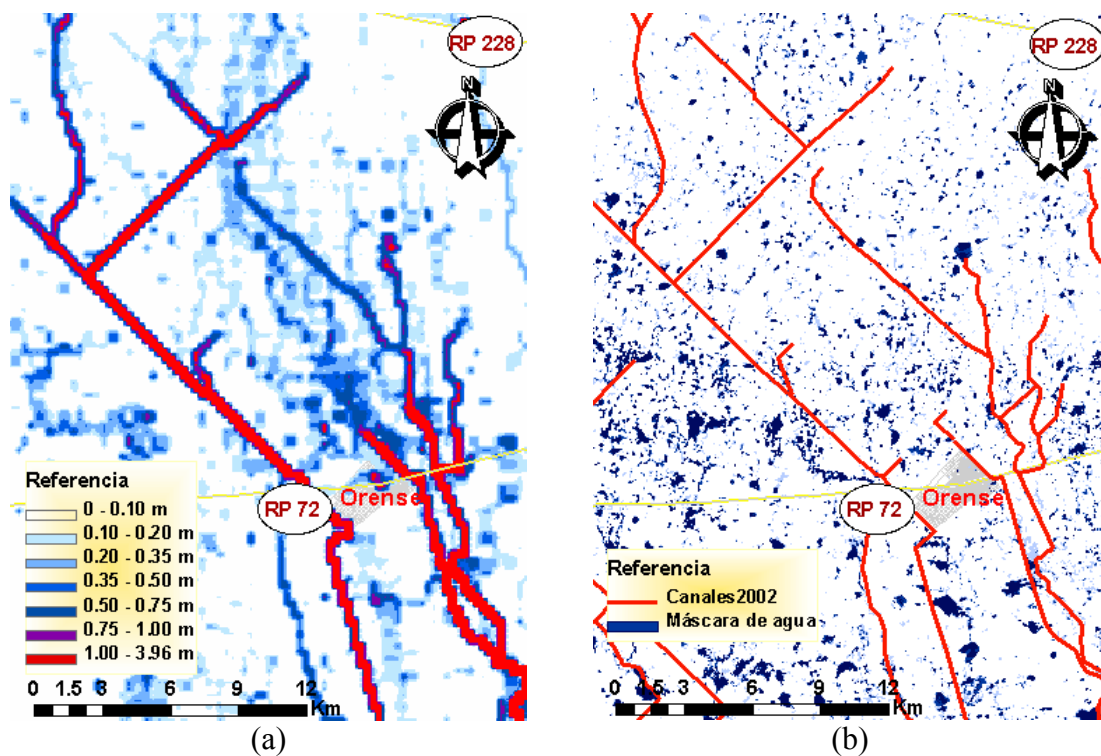


Figura 8 – Imágenes correspondientes al décimotercer día después de terminada la lluvia. (a) Resultados valores de $CN = 65$ y $n_{ov} = 0,20$. (b) Máscara de agua determinada con la imagen Landsat

Análisis de detalle de la representatividad de los resultados del modelo

En esta etapa del proceso de calibración, se evaluó con un mejor detalle la representatividad de sus resultados. Las imágenes obtenidas con los valores estimados de CN y nov que representan la distribución espacial del agua sobre el terreno se compararon con las imágenes satelitales y observaciones de los pobladores de la zona.

En las Figuras 9 y 10 se comparan en un sector comprendido entre las RP 228 y 72 las imágenes de los resultados con las satelitales. En las imágenes se señalaron con amarillo los sectores de anegamientos, producidos por depresiones del terreno y/o desbordes de canales, que fueron reproducidas adecuadamente por el modelo. La representación de los almacenamientos superficiales por parte del modelo muestra que a nivel general fue adecuado utilizar el DEM 270 m para representar la topografía de la zona.

El modelo, también representó en forma satisfactoria, las áreas de buen drenaje del sistema real, estos sectores están señalados con azul en la Figura 10. Esto se debe principalmente que el valor de nov, obtenido de la calibración permite que el modelo represente adecuadamente la variación temporal de la superficie con agua sobre el terreno.

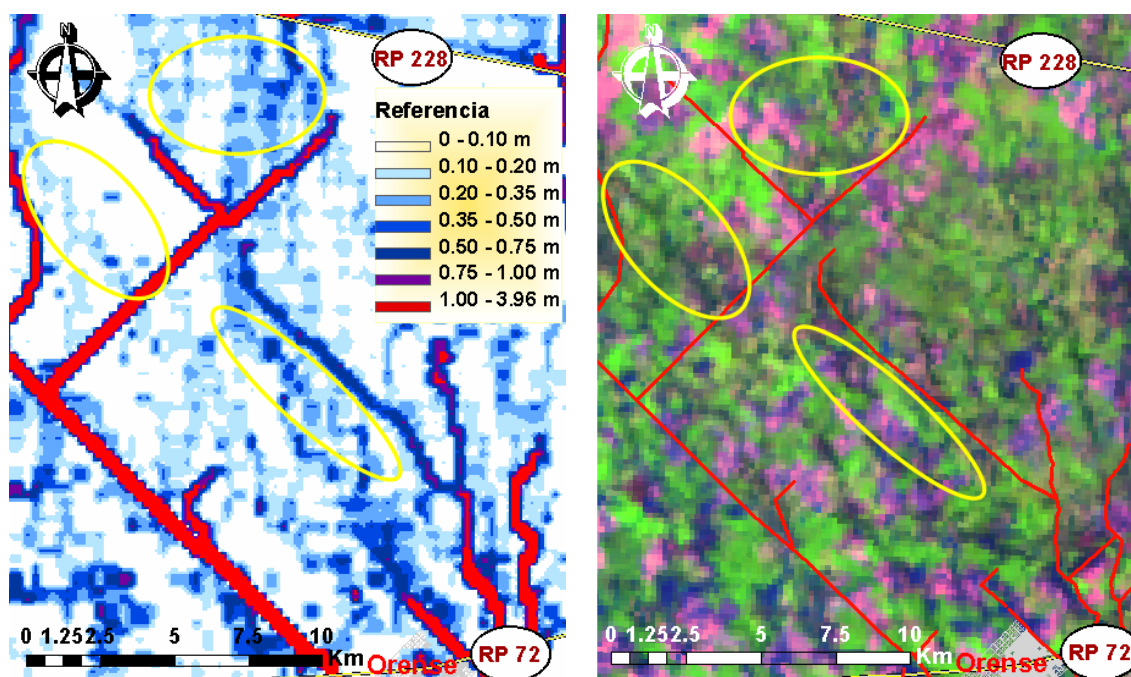


Figura 9 – Comparación de la visualización de los resultados de la modelación con las imágenes satelitales para cuarto día después de terminada la lluvia.

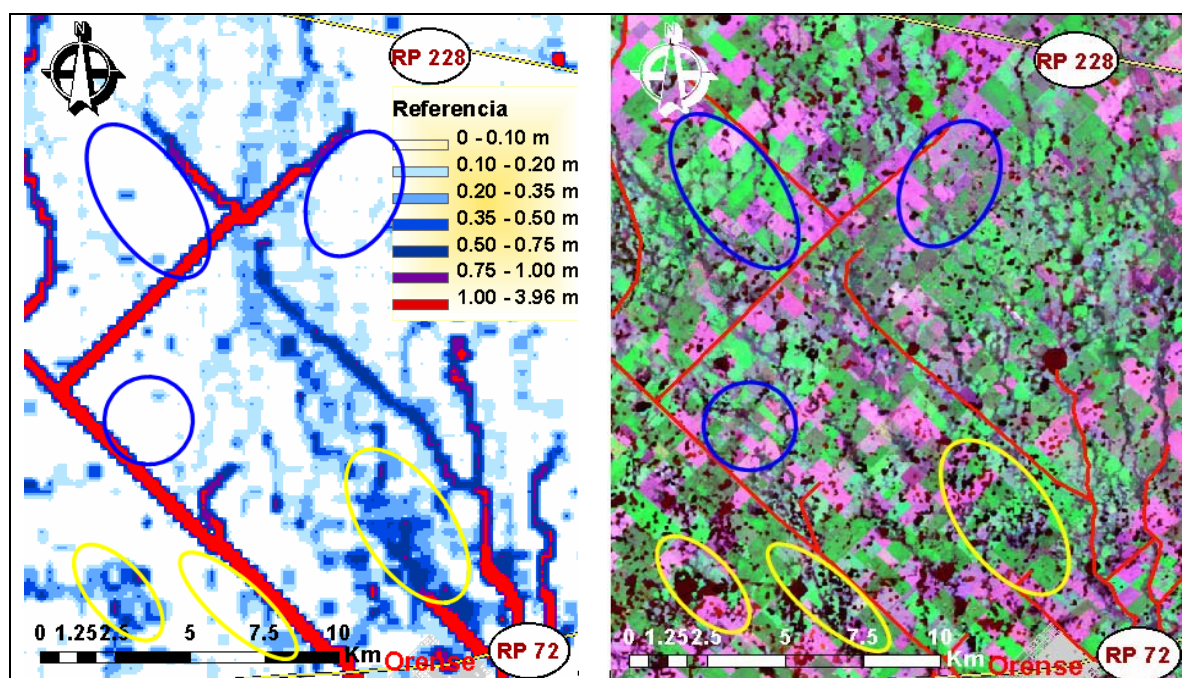


Figura 10 – Comparación de la visualización de los resultados de la modelación con las imágenes satelitales para decimotercer día después de terminada la lluvia.

APLICACIÓN DEL MODELO

Los resultados del modelo se utilizaron para realizar dos análisis, un análisis del movimiento multidireccional del agua sobre la superficie del terreno y un análisis de la zonificación de inundación para la actividad agropecuaria.

Evaluación multidireccional del escurrimiento

En este análisis se evaluó la variación de la superficie y forma de las áreas de aporte a las secciones de salida y la dirección del escurrimiento sobre el terreno. Para realizar estos análisis se utilizó un algoritmo que determina las celdas que aportan a cada celda destino (CD) a partir de los resultados del SSHH-I. El algoritmo utiliza el valor de caudal de cada vinculación en un intervalo de tiempo para determinar el camino que recorre el agua desde una celda inicial (i) hasta la CD. Las celdas que aporta a una misma CD constituyen el área de aporte a dicha celda.

El algoritmo comienza el cálculo en una celda i evaluando los egresos de caudales de la misma. El algoritmo puede escoger como caudal de salida el máximo (Q_{\max}) o el segundo en magnitud (Q_2^{do}), e identifica hacia que celda vecina se dirige el agua. Paso seguido el programa se sitúa sobre la celda donde fue descargada el agua y repite el análisis de los caudales salientes. Este cálculo es repetido hasta llegar a una celda que no tenga salida de agua o sea un punto de salida del sistema. Las celdas que se recorrieron hasta llegar a la CD determinan el camino del caudal máximo (Q_{\max}). En la Figura 11 se presenta un ejemplo de como funciona el algoritmo para Q_{\max} y para Q_2^{do} . Con este algoritmo se pudo calcular el camino del escurrimiento desde una celda i a un CD en función del Q_{\max} o del Q_2^{do} .

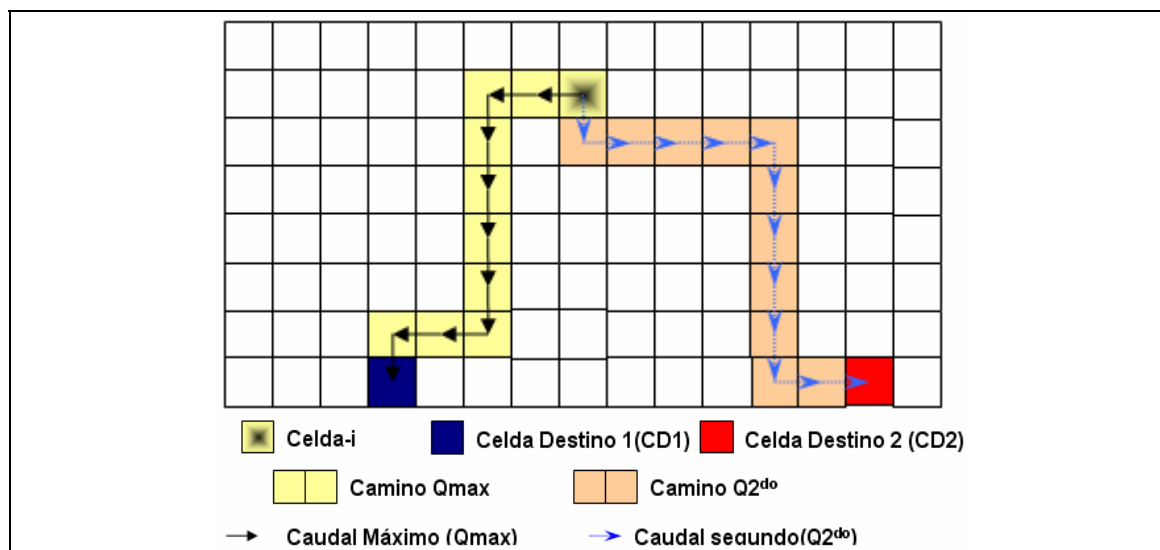


Figura 11 – Esquema del resultado de la aplicación del Cuencador (a) y (b) son ejemplos de posibles resultados para la vía de escurrimiento de Qmax y Q2^{do}

El algoritmo mencionado se implementó en la zona de estudio. Para esto se utilizaron los resultados obtenidos con el SSHH-I correspondientes a la simulación del sistema para una lluvia constante. La evaluación de los resultados generados con este algoritmo permitió determinar las áreas de aporte a cada sección de salida y su variación de forma y tamaño en el tiempo. Además, con el análisis de los caminos que puede tener el agua para escurrir se verificó que algunas celdas aportan al mismo tiempo a dos secciones de salida.

En la Figura 12 y 13 se muestran las áreas de aporte determinadas con la dirección del Qmax saliente de cada celda con las del Q2^{do} para distintos intervalos de tiempo. La diferencia entre las áreas de aporte determinadas con el Qmax y Q2^{do} en un intervalo de tiempo que se observan en estas figuras se produce por el movimiento multidireccional del agua. El agua en un área puede estar escurriendo, simultáneamente, en dos direcciones diferentes, o sea una celda puede estar aportando al mismo tiempo a diferentes celdas destino, es decir trasvasando hacia otra área de aporte. Esto muestra que el agua generada en una celda no tiene un único camino de escurrimiento.

También, se observa que las áreas de aporte cambian de forma y tamaño en el tiempo. Estos cambios se producen porque las celdas que aportan a una determinada celda destino, varían su tirante de agua y cambian la dirección de su aporte hacia otra en el siguiente período de tiempo.

Los fenómenos mencionados indican que en este sistema el movimiento del agua sobre el terreno es principalmente gobernado por la pendiente hidráulica y no la topográfica. Esto último sumado a que el terreno es muy plano genera que variaciones de pequeña magnitud en la altura del agua sobre las celdas causen el cambio de dirección del escurrimiento superficial. Estos cambios de dirección terminan provocando que sea dinámica la superficie de las áreas de aporte.

Las características del funcionamiento del sistema causan que no exista una única relación entre el agua caída en el área de aporte y los caudales medidos en un punto de salida, mostrando que el concepto de cuenca no es aplicable en estas áreas. Por ello, las determinaciones de caudales en las secciones de salida no brindan la información suficiente para realizar una calibración del sistema.

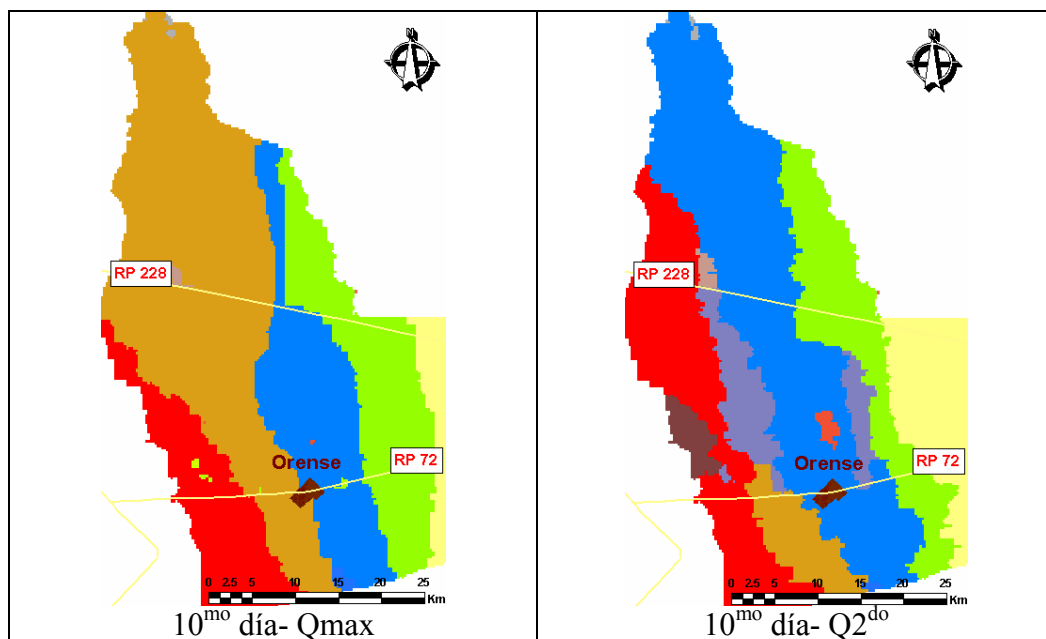


Figura 12 – Áreas de aporte determinadas para 15^{to} y 25^{to} día de comenzada la lluvia cte, considerando la dirección del Qmax saliente de cada celda y del Q2^{do}

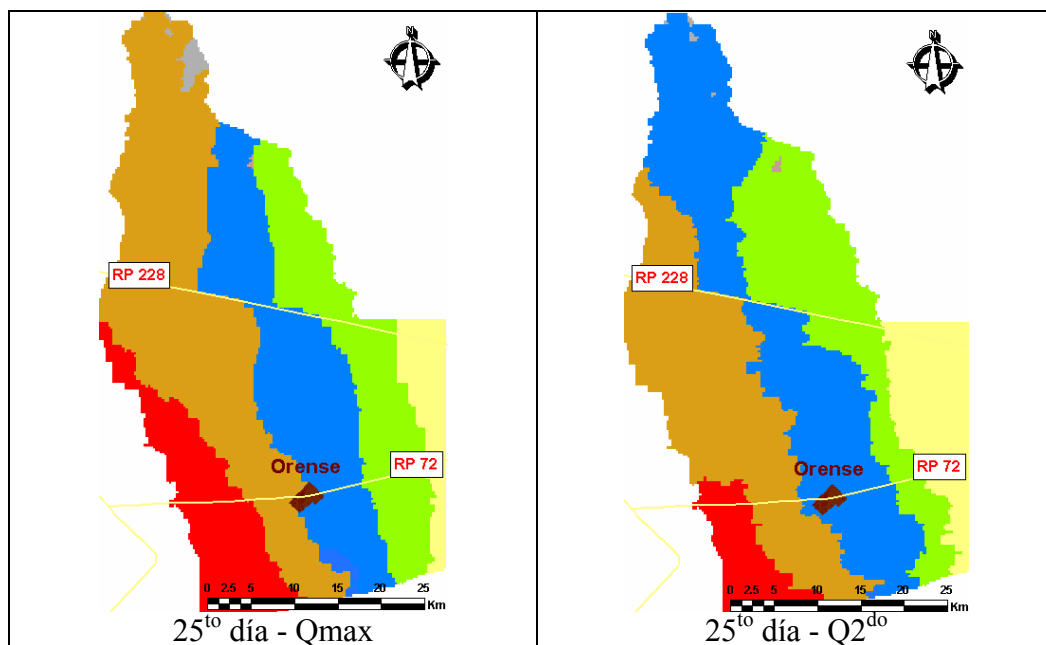


Figura 13 – Áreas de aporte determinadas para 15^{to} y 25^{to} día de comenzada la lluvia cte, considerando la dirección del Qmax saliente de cada celda y del Q2^{do}

El análisis realizado mostró que el escurrimiento sobre la superficie del terreno es el proceso que incide en las variaciones de la forma y tamaño de las áreas de aporte, influyendo en la respuesta del sistema estudiado. Debido a esto, para modelar estos sistemas es necesario representar de manera adecuada y con una buena escala de detalle el movimiento del agua sobre el terreno

Zonificación para riesgo por inundación en el sector agrícola

La aplicación de modelos distribuidos de detalle para la simulación de eventos en áreas de llanura permite ver el alcance que estos fenómenos tienen espacialmente. En áreas con una fuerte actividad agropecuaria las inundaciones producen pérdidas a nivel de rendimiento y calidad de cultivos, además de problemas de transitabilidad y cambios en la gestión de la producción. Por ello,

se hace necesaria la evaluación del riesgo que un sector agrícola tiene ante las inundaciones.

En el análisis de riesgo por inundación del sector agrícola la amenaza es la inundación de los campos que provoca pérdidas de la producción agrícola. La exposición es la posibilidad de que el sector agrícola sea alcanzado por la inundación y la vulnerabilidad la afectación que el fenómeno tiene sobre los campos.

Para estudiar la susceptibilidad del área de estudio a las inundaciones se deberá especificar qué tipo de uso de suelo y en qué etapa se encuentra el cultivo. La permanencia y altura de agua alcanzada define la vulnerabilidad del mismo a la inundación, por ello se definen mapas representativos de cada etapa de cultivo y cuán sensible es cada uno a la presencia de excesos hídricos.

El anegamiento en general, según la lluvia, se extiende sobre muchas hectáreas como una lámina de pequeño espesor, poco movimiento horizontal y gran permanencia (Fuschini Mejía, 1994). Para definir la zona de riesgo no se debe usar el concepto cota-altura en el cauce y valle de inundación (vertical) sino el de superficie inundable (horizontal), que puede (y suele) no tener relación con un río o arroyo.

La modelación matemática distribuida permite analizar detalladamente el comportamiento y cobertura que una inundación puede tener. Los mapas calculados dan como resultado las áreas posibles de ser afectadas por anegamientos debido a desbordes de cauces o escurrimiento en lámina. Siempre que una celda del modelo pueda estar anegada estará expuesta y por ello corre el riesgo de ser afectada por la inundación. Dependerá del tiempo de recurrencia del evento que la afecte el mayor o menor riesgo. La combinación de esta información con las de tipo de suelo, tipo de cultivo y ciclo vegetativo provee los elementos para el análisis de riesgo.

Los eventos simulados se calculan a partir del análisis probabilístico de las lluvias máximas diarias para la serie 1940-2003 en la Estación Barrow (INTA-MAA). Para las tormentas de proyecto se utilizó la misma distribución porcentual que una tormenta observada. En este caso se calculan para tres días consecutivos de lluvia con la distribución porcentual del evento del 9 de noviembre de 2002.

La simulación de estos eventos con el modelo SSHH-I permite calcular para cada celda la altura máxima y tiempo que esta permanece anegada por encima de un determinado valor umbral. Los valores umbrales que definen un anegamiento o inundación en una celda, evaluados según la afectación de la productividad agrícola, son dos: altura y permanencia de agua. Como una primera estimación, se ha definido que aquellas áreas con altura mayor que 0,20 m durante más de 3 días son consideradas anegadas ya que, en general, perjudican la productividad agrícola, independientemente del cultivo y estado fenológico del mismo.

Con estos elementos se están definiendo los mapas de zonificación de inundación (Figura 14) según las recurrencias de eventos. En la Figura 14.(a) se observa cómo una tormenta con 10 años de recurrencia cubre además de las zonas aledañas a los canales, áreas productivas sin conexión directa a los desagües naturales. Esta situación es mucho más comprometida para el sector agrícola si la tormenta tiene una recurrencia de 50 años como se observa en la Figura 14.(b).

Con las zonificaciones se podrá evaluar el daño que un evento de recurrencia conocida

produce sobre un determinado cultivo (rendimiento, crecimiento, enfermedades, etc.), la transitabilidad en el sector productivo (ingreso de maquinaria agrícola, salida de la cosecha, mantenimiento, etc.) y el impacto sobre las estrategias agrícolas a implementar. Este conjunto de variables permitirá generar los mapas de riesgo por inundación del sector productivo agrícola.

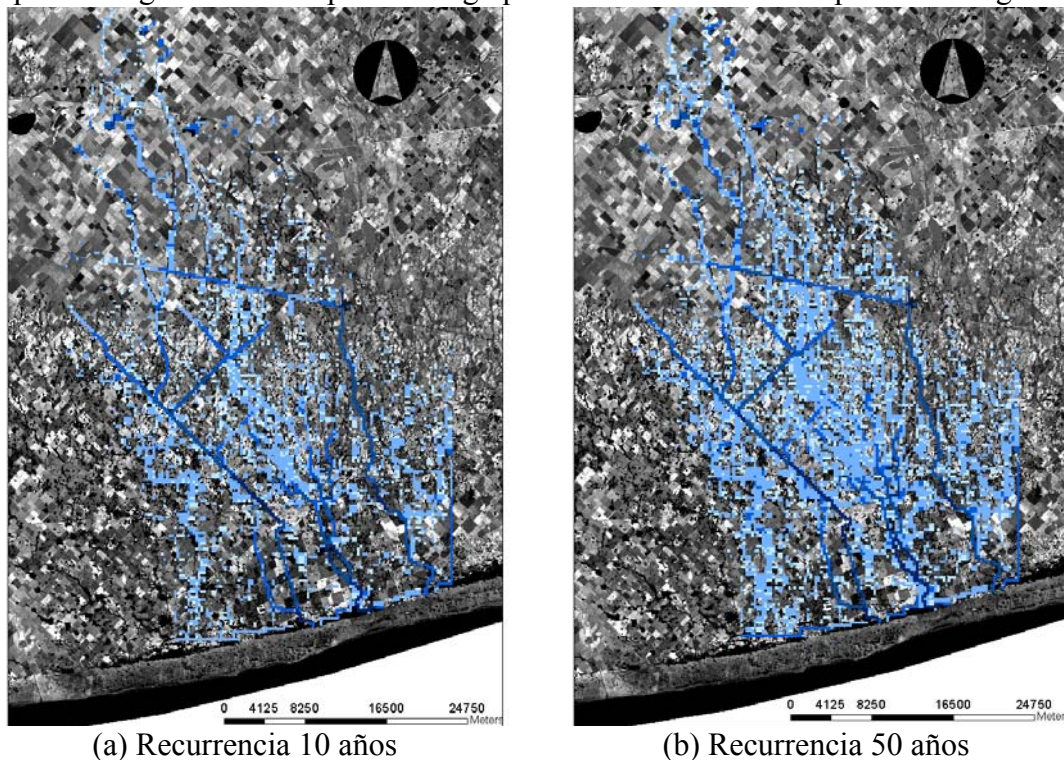


Figura 14 – Mapa de inundación resultante para tormentas de diferentes tiempos de recurrencias

CONCLUSIONES

Calibración del modelo distribuido de grilla

Con el análisis de la etapa de calibración del modelo distribuido de grilla se determinaron las conclusiones citadas a continuación

El modelo SSHH-I al representar la variabilidad espacial y temporal del agua sobre la superficie del terreno pudo ser calibrado cualitativamente mediante la comparación con imágenes satelitales. Las imágenes de satélites corresponden a instantes específicos en el tiempo, a diferencia de un hidrograma, que es “continuo” a lo largo de un periodo.

El análisis de la evolución temporal de la superficie de agua sobre el terreno permitió calibrar el valor de n_{ov} . A partir de esa calibración, la superficie de agua generada por el modelo reprodujo adecuadamente la distribución en planta del agua, tal como es visible en las imágenes disponibles. Esto muestra que ésta metodología puede ser una alternativa para la calibración del SSHH-I en sistemas de llanura.

Por las características de la calibración, la representación de los resultados del modelo tiene una importancia relevante. Por eso es necesario generar una visualización de los resultados del modelo que sea representativa en términos físicos. En caso de no conseguirse una visualización adecuada, eso debe ser tenido en cuenta en el proceso de calibración.

La simulación del escurrimiento sobre la superficie del terreno y del escurrimiento encauzado que realiza el SSHH-I permite analizar el comportamiento de los sistemas de llanura. La simulación del sistema con este modelo genera información para identificar problemas que causan anegamientos, terrenos inundables, vías preferenciales de escurrimiento, etc.

El SSHH-I es una herramienta que aporta información para el planteo de medidas en la gestión y planificación de los recursos hídricos en áreas con características de un sistema de llanura. La información sobre estados de inundación del terreno y su distribución espacial es fundamental para la toma de decisiones de los distintos actores de estos sistemas (productores, técnicos, políticos, etc.).

Aplicación del Modelo

La evaluación de los resultados generados del análisis del movimiento multidireccional del agua sobre el terreno realizada permitió identificar la presencia de los fenómenos que caracterizan a los sistemas de llanura y plantear las siguientes conclusiones:

Las áreas de aporte del sistema estudiado no tienen límites fijos, y varían en tamaño y forma. El fenómeno que produce la variación de estas áreas es el trasvasamiento de agua entre ellas, ya que la altura de las “divisorias de aguas” es del mismo orden que el tirante del escurrimiento superficial.

Lo comentado en el párrafo anterior muestra que el concepto de cuenca en estos sistemas no es aplicable, ya que las “divisorias de aguas” no están bien definidas, y además frecuentemente no es posible definir un punto que sea representativo del comportamiento del sistema. La presencia de trasvasamientos y el movimiento multidireccional del agua hacen que en el sistema no exista una única relación entre el agua caída sobre cada área de aporte y los caudales medidos en las secciones de salida

El cambio de forma y tamaño de las áreas de aporte muestran la necesidad de simular el escurrimiento sobre la superficie del terreno con una buena escala de detalle para obtener una adecuada representación de la respuesta del sistema.

La representación espacial de detalle permite la valoración distribuida de la problemática que las inundaciones generan sobre la producción agrícola. El riesgo por inundación es una herramienta que evalúa el conjunto de elementos asociados al evento, por lo que permitiría gestionar o prever las prácticas más favorables o conservadoras de manejo agropecuario.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Vialidad e Hidráulica Rural del partido de Tres Arroyos, Prov. de Bs. As, Argentina.

Este trabajo ha sido desarrollado con financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) – Argentina a través del PID 35765.

BIBLIOGRAFÍA

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. (1980) “*Practical Aspects of Computational River Hydraulics*” Pitman Advanced Publishing Program.

FUSCHINI MEJÍA M. (1994). “El agua en las llanuras”. UNESCO-ORCYT. 58 p.

RENTERÍA J. y STENTA, H. (2003) “*Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial*”. Tesis de Grado Ingeniería Civil. FCEIA – UNR. Rosario, Argentina. Inédito.

RICCARDI G. (2000). “*Cell model for hydraulic modeling*”. Journal of Enviromental Hydrology. Vol. 8, paper 15, 1-13.

VILLANUEVA, A.; SCIOLI, C.; VIVES, L. y GIL, F. (2007) “*Hidrología Superficial en el Partido de Tres Arroyos, Provincia De Buenos Aires (Parte II)*”; Informe Técnico 15

VILLANUEVA, A., CAZENAVE, G. y BILELLO, G. (2009). “*Valor Económico del Control de Inundaciones en el Partido de Tres Arroyos, Pcia. de Buenos Aires, Argentina*”. REGA - Revista de Gestión del Agua de América Latina. CEPAL-ABRH-GWP ISSN 1806-4051. No prelo.